

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420298

研究課題名(和文)生産性と光学特性に秀でたチューナブル波長選択フィルタチップの継続開発

研究課題名(英文)Development of tunable wavelength filter chip with remarkable productivity and optical properties

研究代表者

依田 秀彦(Yoda, Hidehiko)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30312862

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：次世代光アクセス網の高速大容量技術方式WDM-PONにおけるキーデバイス、チューナブル波長選択フィルタの開発を行った。光学薄膜を利用した2種類のフィルタ(温度制御型TO-BPF、電圧制御型EO-BPF)の作製技術とデバイス性能向上を進め、成果は以下の9項目：a-Si:D/SiNx TO-BPFによる耐熱性改善、TO-BPF成膜後熱処理による波長シフト、TO-BPFチップのファイバ実装化、BPF成膜時の光学モニタ法改良、中心波長温度係数の高精度測定、EO-BPF用構成要素の検討、1キャビティ型EO-BPFの試作、PLZT薄膜の強誘電性評価、ITiO<sub>2</sub>近赤外透明導電膜の特性評価

研究成果の概要(英文)：In future optical access network based on WDM-PON, wavelength-tunable narrow bandpass filters (BPFs) are required for colorless optical network units. Tunable BPFs using a-Si:D/SiO<sub>x</sub> multilayer have simple structure, high productivity, narrow bandpass (0.8 nm), and wide tuning range (30 nm). The tunable BPF is based on thermo-optic effect in thin film of amorphous silicon. In fabrication, a-Si:D/SiO<sub>x</sub> multilayer was deposited using RF magnetron sputtering. A heating layer of ITiO<sub>2</sub> film was formed on the multilayer in advance. The BPF chip size was 2x2 mm and 0.05 mm<sup>2</sup>. When current is applied to the heater layer, both temperature and selective wavelength of the BPF increase. We measured the center wavelength of the BPF chip when the power consumption at the heating layer was varied. The power of 0.3 W was used for the wavelength shift of +20 nm. It is noteworthy that the power required for the wavelength shift of +30 nm can be reduced to 0.45 W.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光波長フィルタ 光デバイス 透明ヒータ膜

## 1. 研究開始当初の背景

3~7年後の光ファイバ加入者系通信網では、ユーザ宅に設置される ONU (光回線終端装置) の中に、小型で高信頼性のチューナブル波長選択フィルタが必須となる。光ファイバ中には数 10~100 本の波長多重化信号が伝搬している。ユーザへの波長割当や波長数増加に対して柔軟に対応するため、ONU にはカラーレス化 (全波長対応) が強く要求されている。チューナブル波長選択フィルタは、波長多重化信号の中から所望の波長を可変選択する光波制御素子であり、カラーレス ONU を実現するためのキーデバイスとなる。

ONU 用途のチューナブル波長選択フィルタには、高生産性 (つまり安価) と高性能を併せもつことが要求される。これまで様々な方式のチューナブル波長選択フィルタが提案されているが、いずれも高生産性と高性能を同時には満足せず、カラーレス ONU 用途に適するフィルタは現在まで存在していない。

## 2. 研究の目的

本研究では、カラーレス ONU 用途のチューナブル波長選択フィルタとして、光学薄膜を利用した 2 種類のフィルタ (温度制御型、電圧制御型) の開発を目指す。

### (1) 温度制御型の目標 (3 点):

これまで継続的に開発しており、残された以下の課題を解決して高性能なフィルタの実現を目指す。

成膜技術と透過スペクトルの改善 (光学モニタ変動 0.01% 以下、フィルタキャビティ数 3~4、スペクトル形状ファクタ 0.5 以上、吸収損失 10% 以下)

消費電力と応答速度の改善 (0.2W 以下、0.5 秒以下)

モジュール化 (フィルタチップ、ファイバコリメータ)、総合的な性能評価

### (2) 電圧制御型の目標 (2 点):

前者で培った作製技術をベースに、作製を試みる。

作製技術の開発 (プロトタイプ試作、狭帯域化 5nm 以下)

フィルタ性能の実証 (波長可変範囲 10nm 以上、消費電力 0.1W 以下、応答時間 1 秒以下)

## 3. 研究の方法

2 種類のフィルタ (温度制御型、電圧制御型) の開発を、年度別に以下のように進める。

### (1) 温度制御型の方法

(平成 26 年度)

異なる 2 つの材料系を用いて TO-BPF を作製し、耐熱性 (光吸収率の温度依存性) を

評価する。

in-situ 光計測の精度と安定性を向上させるため、帯域可変フィルタを用いて光学モニタ系を改良する。

ポストアニールによる膜応力分布緩和と波長シフトとの因果関係を究明する。

(平成 27 年度)

透明ヒータ膜付 TO-BPF チップをファイバに組み込んだ省スペースモジュールを試作し、光学特性を評価する。

TO-BPF への入射ビーム直径と、高温時のスペクトル特性劣化との因果関係を実験的に考察する。

室温から 150℃ まで温度変化時の TO-BPF 中心波長シフト量  $d\lambda/dT$  を高精度に評価する測定系を構築する。

(平成 28 年度)

フィルタ多層膜の成膜精度向上を図るため、成膜中の in-situ 光学モニタ系を改良 (モニタ光のビーム径を小さく) する。

前年の TO-BPF チップのファイバ実装化を推し進め、チップを薄型化して特性改善を図る。

前年の  $d\lambda/dT$  評価測定系の改良を推し進め、TEC ファイバ光学系を導入して測定精度の向上を図る。

### (2) 電圧制御型の方法

(平成 26 年度)

結晶性と EO 効果を得るため、EO-BPF の構成要素について実験的に検討する: 最適な基板、シード層材料、透明電極材料、アニール温度、フィルタ構造、作製プロセス。

(平成 27 年度)

様々な材料の誘電体多層膜ミラーの耐熱性 (PLZT アニール温度 700℃ 処理後に光学特性の劣化有無) を評価する。

EO-BPF の構成要素について引き続き検討する: PLZT 溶液組成の変更、PLZT 薄膜の形成手順見直しと熱処理条件再検討。

1 キャビティ型 EO-BPF を試作する。光学設計仕様はゆめに設定する。

ITiO 透明導電膜の成膜条件を実験的に検討し、光学特性と電気特性を評価する。

(平成 28 年度)

強誘電性薄膜 PLZT の電気光学効果を間接的に評価する目的で、PLZT の D-E ヒステリシスループを評価し、PLZT 形成条件にフィードバックする。

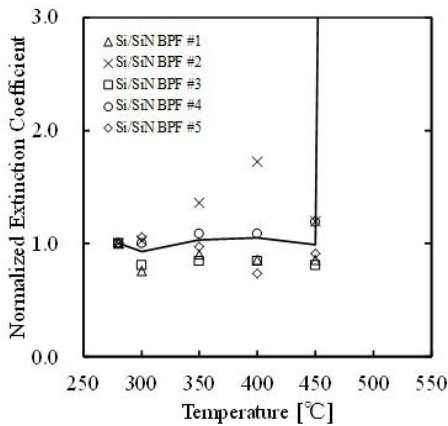
700℃ アニール後の特性を向上させるため、ITiO 透明導電膜の成膜条件を再検討する。

## 4. 研究成果

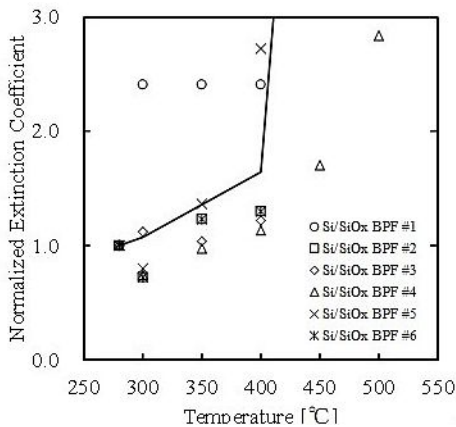
- (1) a-Si:D/SiN<sub>x</sub> TO-BPF による耐熱性改善  
a-Si:D/SiN<sub>x</sub> TO-BPF と a-Si:D/SiO<sub>x</sub> TO-BPF

を作製し、ポストアニールを施す。更に真空電気炉にて高温熱処理を施した後、室温に戻して分光測定を行った。分光測定から TO-BPF スペーサ層の消衰係数を算出した。

各 TO-BPF 消衰係数の熱処理温度依存性の測定結果を図 1 に示す。各チップ試料のポストアニール後の消衰係数  $\kappa_0$  を基準として、高温熱処理後の消衰係数  $\kappa$  を規格化して評価した ( $\kappa/\kappa_0$ )。a-Si:D/SiN<sub>x</sub> TO-BPF では、熱処理温度 450 まで消衰係数は変化せず、500 で膜の劣化が発生した。一方 a-Si:D/SiO<sub>x</sub> TO-BPF では、熱処理温度 400 まで少しずつ消衰係数が増加し、450 で膜の劣化が発生した。SiN<sub>x</sub>を用いることで、高温時 450 まで吸収率増加を抑えられることを実証した。



(a) a-Si:D/SiN<sub>x</sub> TO-BPF



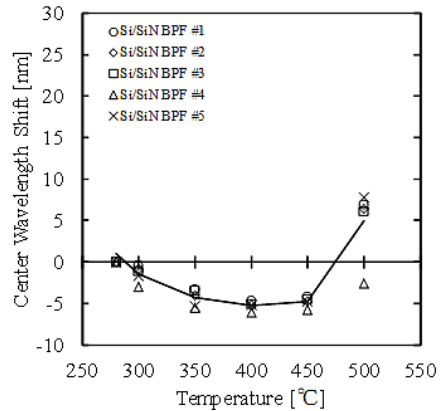
(b) a-Si:D/SiO<sub>x</sub> TO-BPF

図 1 TO-BPF 消衰係数の熱処理温度依存性

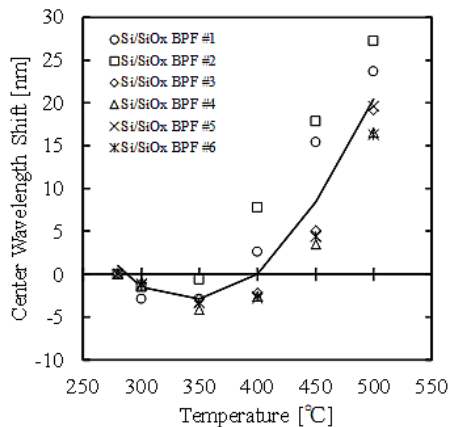
### (2) TO-BPF 成膜後熱処理による波長シフト

TO-BPF 成膜後の熱処理による中心波長シフト量を実験的に調べた。測定結果を図 2 に示す。各試料のポストアニール後の中心波長  $\lambda_0$  を基準として、高温熱処理後の中心波長  $\lambda$  の変化量 ( $\lambda - \lambda_0$ ) を評価した。a-Si:D/SiN<sub>x</sub> TO-BPF では、熱処理温度 450 まで中心波長変化量はマイナスとなり、500 ではプラスになる。通常のポストアニールにより、成膜時に蓄積された膜内部応力が緩和されると、中心波長変化量はマイナスになる。一方、中心波長変化量がプラスになるのは、アニールの効果ではなく、別の原因(膜の劣化?)に

起因するものだと考える。一方 a-Si:D/SiO<sub>x</sub> TO-BPF では、熱処理温度 350 までは中心波長変化量はマイナスであり、アニール効果で説明できるが、400 以上ではプラスになり膜劣化の可能性があると考える。



(a) a-Si:D/SiN<sub>x</sub> TO-BPF



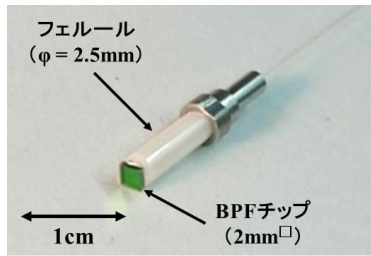
(b) a-Si:D/SiO<sub>x</sub> TO-BPF

図 2 TO-BPF 中心波長の熱処理温度依存性

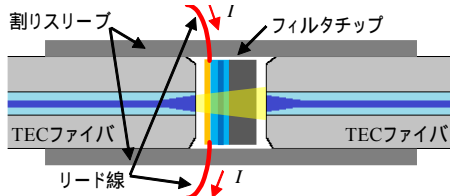
### (3) TO-BPF チップのファイバ実装化

光ファイバ間に TO-BPF チップを実装するのに、フェルールに挿入固定された 2 本の光ファイバと割スリーブを用いた(図 3)。コア直径 30 $\mu$ m の熱拡散コア(TEC: Thermally-Expanded Core)ファイバを用いることで、TO-BPF チップの厚み分のギャップ ( $\leq 0.5$ mm) に対して接続損失 0.6dB 以下に抑制できる。またジルコニア製フェルールと割スリーブを用い、2 本のファイバの軸ずれは 1 $\mu$ m 程度以内(軸ずれ損失 0.1dB 以下)であり、光軸アライメントフリーとみなせる。

光学特性を評価し、挿入損失 0.7dB (内、ギャップ損失 0.6dB, 過剰損失 0.1dB)であった。また TO-BPF チップ上に形成した透明ヒータ膜に電流を流し発熱させ、TO-BPF 温度(ヒータ膜での消費電力/mW)を変化させたとき、中心波長シフト量/nm を評価した。TO-BPF チップ(基板厚 0.5mm<sup>1</sup>, 0.2mm<sup>1</sup>)に対して、波長シフトに対する消費電力効率はそれぞれ 33, 22mW/nm となった。更なる薄型化・小型化によって消費電力の抑制が期待できることを明らかにした。



(a) フェルールに取付けた TO-BPF チップ

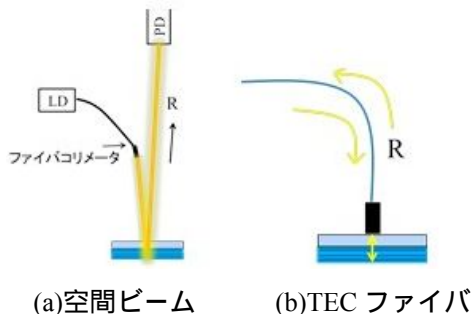


(b) 割りスリーブに挿入

図3 TO-BPF チップ実装構造

(4) BPF 成膜時の光学モニタ法の改良

多層膜の光学膜厚を精度良く作るため、成膜時の多層膜に単色光を当てて反射光量をモニタする(図4)。従来の空間ビーム(0.8mm)では照射部面積が大きく、膜厚分布があるとその影響を無視できない。一方、新しく採用した TEC ファイバ(0.03mm)では照射部面積を小さく、膜厚分布の影響を抑制でき、光軸アライメントも比較的容易である。BPF 成膜時のモニタ反射率変化の一例を図5に示す。最終層でのモニタ反射率が理論値通り数%まで下がりきることを確認できた。またスペーサ層前後でのモニタ反射率が完全に対称でなく、モニタに改善の余地が残る。



(a)空間ビーム (b)TEC ファイバ  
図4 光学モニタ方法

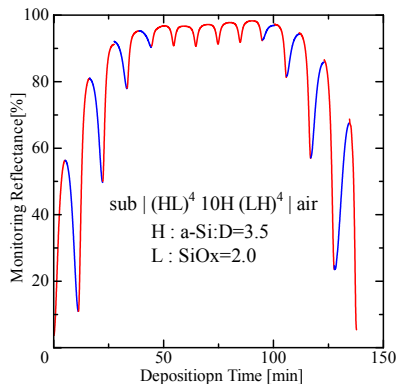


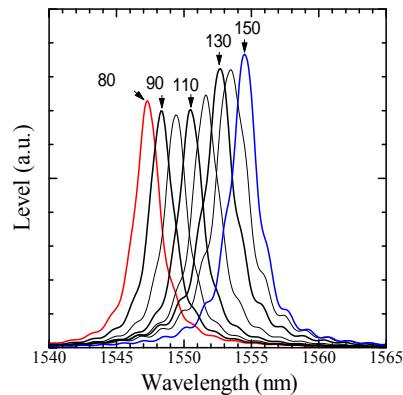
図5 モニタ反射率変化の実測

(5) 中心波長温度係数  $d\lambda/dT$  の高精度測定

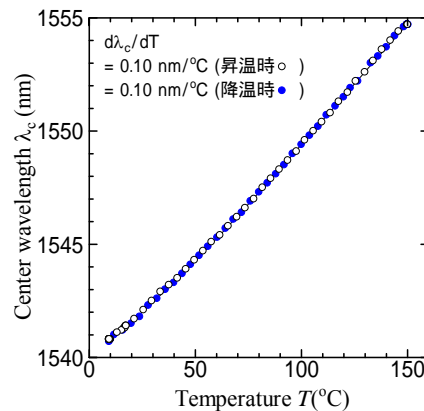
室温から 150 まで温度変化させた時の TO-BPF 中心波長シフト量  $d\lambda/dT$  を高精度に評価する測定系を構築した。TO-BPF 試料を環境試験器の中に入れて試験器温度を変化させ、また外部から試料に白色光を当てて光スペアナで分光して中心波長を測定した。

当初、空間ビームを試料に当てファイバ受光する測定系を構築したところ、100 以上の高温にて受光量が大きく減少(悪化)した。この理由が、陽炎と同様、環境試験器内の温まった空気がファンにより攪拌され、空間ビームが通過する空気の屈折率が時間的/空間的に揺らぎ、光路がずれて受光側ファイバへの結合効率が悪化することにある。

この問題を解決するため、入射側と出射側からそれぞれファイバを環境試験器内に導入し、双方のファイバ in フェルールの間(ギャップ 0.5mm 程度)に TO-BPF チップ試料を挿入する測定系に改良した。その結果(図6)、高温時での透過光量の減少はなくなり、中心波長も時間的に安定になった。さらに昇温時と降温時での波長差が全温度範囲で 0.1nm 以下(温度換算で 1 以下)であり、十分に高精度で信頼性のある結果を得ることに成功した。



(a)透過スペクトルの温度依存性(昇温時)



(b) 中心波長の温度依存性

図6 TO-BPF 中心波長の温度依存性(10~150)の測定結果

(6) EO-BPF 用構成要素の検討

透明性，線膨張係数，高温耐熱性の観点から C 面サファイア( $Al_2O_3$ )基板を選択した。サファイア基板は PLZT とほぼ等しい線膨張係数を持ち，十分な高温耐熱性を有する。

下部ミラー層には，高反射率，低損失，高温耐熱性が求められる窒化珪素  $SiN_x$ /二酸化珪素  $SiO_2$  を高/低屈折率層に用いた。窒化珪素  $SiN_x$ /二酸化珪素  $SiO_2$  が 600 超の高温耐熱性を有することを実験的に確かめた。

PLZT 強誘電薄膜(スピコート法)および ITiO 透明導電膜(スパッタ法)の形成に関する実験的検討を行った。結果は後述。

(7) 1 キャビティ型 EO-BPF の試作

PLZT と誘電体交互多層膜ミラーを用いて 1 キャビティ型 EO-BPF を試作した。図 7 に試作したフィルタ構造を示す。基板側から順に， $SiN_x/SiO_2$  多層膜(下部ミラー層, 6 ペア) → ITiO(下部電極兼シード層,  $0.3\mu m^t$ ) → PLZT(スペーサ層,  $0.38\mu m^t$ ) →  $SiN_x/SiO_2$  多層膜(上部ミラー層) → ITiO(上部電極層,  $0.3\mu m^t$ ) を形成した。

透過スペクトル測定し，フィルタ中心波長  $1677nm$ (設計  $1550nm$ )を得た。PLZT 膜厚精度を向上させる必要性がわかった。

電圧印加実験を行い，PLZT 層の絶縁性を確保できず EO 効果による波長シフトを観測できなかった。フィルタ構造としたときの PLZT 層の絶縁性は，PLZT 単体での絶縁性とは異なることがわかった。

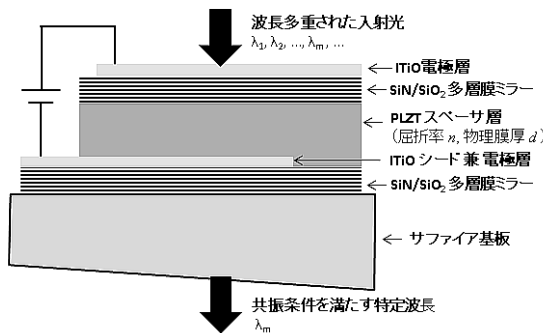


図 7 EO チューナブル波長フィルタの構造

(8) PLZT 薄膜の強誘電性(D-E ループ)評価

強誘電性薄膜 PLZT(9/65/35)の絶縁性および(間接的に)電気光学効果を評価する目的で，PLZT 膜厚，高速熱処理(Rapid Thermal Annealing: RTA)条件を変えて PLZT 膜を形成し，P-E ヒステリシスループを評価した。

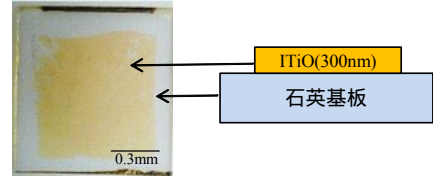
PLZT 膜厚  $0.6\mu m^t$  以下では絶縁性は不十分であり，膜厚  $1.2\mu m^t$  で十分な絶縁性が得られた。また RTA のガス種とガス圧が強誘電性に大きく影響することを実験的に明らかにした。

(9) ITiO 近赤外透明導電膜の特性評価

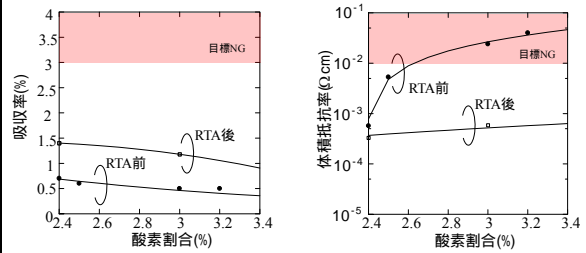
シード層および電極層として，波長  $1.55\mu m$  の光に対して透明性な ITiO( $In_2O_3:TiO_2$ )導

電膜を用いた。ITiO は近赤外波長帯における透明性に関して ITO( $In_2O_3:SnO_2$ )より優れている。

ITiO 膜のスパッタ条件(とくに酸素流量割合)と熱処理条件(とくにガス種)を再検討し，熱処理前後の光吸収率(透明性)と体積抵抗率(抵抗特性)を実験的に評価した(図 8)。RTA 処理時に  $O_2$  100%ガスを用いることで，透明性と体積抵抗率の目標値を満たす ITiO 膜を形成できた。



(a) ITiO 膜面写真



(a) 光吸収率

(b) 体積抵抗率

図 8 RTA 処理した ITiO 膜の特性評価結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

K. Shiraishi, S. Higuchi, K. Muraki, and H. Yoda, "Silver-film subwavelength gratings for polarizers in the terahertz and mid-infrared regions," Optics Express, vol. 24, No. 18, pp. 20177–20186, Sep. 2016, 査読有.  
<https://doi.org/10.1364/OE.24.020177>

〔学会発表〕(計 13 件)

北川大河, 田村拓磨, 依田秀彦, "光ファイバ集積型 TO チューナブル波長フィルタの作製," 第 7 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-17-77, 2017 年 3 月, 足利工業大学(栃木県足利市)。  
 戸賀沢舟, 田村拓磨, 依田秀彦, "TO チューナブルフィルタの光学特性の温度依存性測定," 第 7 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-17-78, 2017 年 3 月, 足利工業大学(栃木県足利市)。  
 小池俊輔, 清水淳, 依田秀彦, "近赤外波長フィルタ用 ITiO 透明電極膜の特性改善," 第 7 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-17-76, 2017 年 3 月, 足利工業大学(栃木県足利市)。  
 木下恭一, 荒井康智, 前田辰郎, 佐藤靖則, 依田秀彦, "TLZ 法による高純度 SiGe 結晶育成," 応用物理学関係連合講演会,

14p-B5-8, 2017年3月, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市).

田村拓磨, 依田秀彦, "マルチキャビティ型 Si/SiO<sub>x</sub> 多層膜フィルタの作製と光学特性評価," 第6回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-16-36, 2016年3月, 前橋工科大学(群馬県前橋市).

清水淳, 山本浩輔, 依田秀彦, "近赤外波長フィルタ用 ITiO 透明電極膜の特性評価," 第6回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-16-86, 2016年3月, 前橋工科大学(群馬県前橋市).

山本浩輔, 清水淳, 依田秀彦, "PLZT チューナブル波長フィルタの作製と NIR 光学特性評価," 第6回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-16-34, 2016年3月, 前橋工科大学(群馬県前橋市).

依田秀彦, 白石和男, "近赤外波長フィルタ用 ITiO 透明ヒータ膜の特性評価," 応用物理学会秋季学術講演会, 13p-2Q-21, 2015年9月, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市).

依田秀彦, 田村拓磨, "a-Si:D/SiN<sub>x</sub> 多層膜フィルタの耐熱性," 応用物理学会秋季学術講演会, 16a-2F-8, 2015年9月, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市).

田島正彦, 依田秀彦, "Si/SiN チューナブル波長フィルタの作製と評価に関する研究," 第5回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-15-74, 2015年3月, 宇都宮大学(栃木県宇都宮市).

飯富真, 依田秀彦, "EO チューナブル波長フィルタ用 PLZT 薄膜の電気及光学特性評価に関する研究," 第5回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-15-62, 2015年3月, 宇都宮大学(栃木県宇都宮市).

K. Shiraishi, M. Horiuchi, H. Yoda, and C. S. Tsai, "Robust lensed fibers having high focusing effects in resin bond," in Proc. International Conference on Electronics Packaging (ICEP 2014), Toyama, Japan, April 23-25, 2014, paper P22.

K. Shiraishi, R. Takasaki, H. Yoda, H. Oshikiri, and C. S. Tsai, "A spot-size converter with vertical down taper for the coupling between single-mode fiber and silicon-wire waveguide," in Proc. International Conference on Electronics Packaging (ICEP 2014), Toyama, Japan, April 23-25, 2014, paper P23.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

依田 秀彦 (YODA, Hidehiko)

宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30312862